

### *Висновки*

1. Розглянуто різні види зносу залежно від величини струму, пробігу, часу експлуатації. Виконано оцінку їх кількісних і якісних характеристик з виділенням основних стадій їх визначення.

2. Сформульовано заходи щодо зменшення зносу вузлів і агрегатів рухомого складу.

3. Оскільки на електротранспорті має місце проходження струму через відповідні вузли, внаслідок чого виникає знос, тому приймання заходів згідно з нормативними вимогами щодо організації технічного обслуговування і ремонту є необхідною умовою.

1. Пономарев А.А., Иеропольский Б.К. Подвижной состав и сооружения городского электрического транспорта. – М.: Транспорт, 1981. – 227 с.

2. Когаев В.П., Дроздов Ю.Н. Прочность и износостойкость деталей машин. – М.: Высш. шк., 1991. – 319 с.

3. Ригни Д.А. Физические аспекты трения и изнашивания / Трибология: Исследования и приложения (опыт США и стран СНГ) / Под ред. В.А. Белого, К. Лудемы, Н.К. Мышкина. – М: Машиностроение, 1993. – 454 с.

*Получено 09.11.2011*

УДК 628.1-192

Н.И.САМОЙЛЕНКО, д-р техн. наук, А.Б.КОСТЕНКО, канд. физ.-мат. наук,  
Т.С.СЕНЧУК, С.И.БОГУЧАРСКИЙ

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

### **МОДЕЛИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ НАПОРНЫХ СЕТЕЙ**

Рассматривается аналитический метод построение математической модели функциональной надежности напорных трубопроводных сетей со сложной структурой.

Розглядається аналітичний метод побудова математичної моделі функціональної надійності напірних трубопровідних мереж зі складною структурою.

The analytic method to construct a mathematical model of the functional reliability of pressure piping systems with a complex structure is considered.

*Ключевые слова:* функциональная надежность, трубопроводные системы.

Основным звеном трубопроводных напорных систем, связывающим источники поставляемого целевого продукта (ЦП) с потребителем, является трубопроводная сеть (ТПС). Именно функциональная надежность (ФН) ТПС определяет степень риска недопоставки ЦП потребителю. В качестве основного показателя ФН выступает вероятность непрерывной поставки (ВНП) ЦП конкретному потребителю в течение определенного периода времени  $T$ , т.е. вероятность того, что в течение указанного времени для транспортирования ЦП от источника к потребите-

лю существует хотя бы одна работоспособная трубопроводная цепь (путь). Объемы поставок ЦП при этом во внимание не принимаются.

Известные методы расчета функциональной надежности ТПС, либо неприменимы для сложных сетей из-за комбинаторного принципа построения модели [1], либо позволяют получать ее оценку [2], либо требуют значительных временных затрат для сбора данных, что неприемлемо для задач проектирования. Перечисленных недостатков лишен аналитический метод [3], который может использоваться как для расчета ФН действующих ТПС, так и проектируемых.

Целью настоящей статьи является совершенствование аналитического метода построения математической модели ФН, подробно изложенного в [3] и позволяющего рассчитывать ВНП ЦП для конкретного потребителя с учетом структуры ТПС в реальном масштабе времени.

Расчет ФН ТПС по аналитической модели связан с понятием «аварийно-ремонтная зона» (АРЗ). АРЗ – это фрагмент сети, который может быть отсечен от нее с помощью сетевой запорной арматуры. Каждый трубопровод принадлежит какой-либо одной АРЗ. Каждая отсекающая задвижка разделяет две смежные зоны.

Аналитический метод расчета ФН ТПС относительно конкретного потребителя базируется на следующих исходных утверждениях:

1. Вероятность выхода из строя трубопровода (техническая ненадежность) прямо пропорциональна удельной интенсивности возникновения повреждений на этом трубопроводе и его длине.

2. Техническая надежность отдельно взятой АРЗ зависит только от состава зоны (трубопроводов, задвижек и т.п.) и не зависит от ее структуры.

3. Отказ любого элемента ТПС, принадлежащей  $k$ -й АРЗ, приводит к отказу всей зоны. Здесь  $k = \overline{1, N}$ , где  $N$  – количество АРЗ в ТПС. АРЗ работоспособна, если работоспособны все конструктивные элементы зоны.

4. Отказ любого элемента ТПС, не принадлежащей  $k$ -й зоне, никакого влияния на функционирование этой зоны не оказывает,  $k = \overline{1, N}$ .

Утверждение 3 диктует выбор «последовательной модели» для расчета надежности АРЗ: надежность зоны  $P_k$  рассчитывается как надежность системы последовательно соединенных элементов. При этом реальное соединение элементов может кардинально отличаться от последовательного.

Искомый показатель ВНП  $P^f$  зависит от: топологических связей между АРЗ; места подключения потребителя к ТПС; технической на-

дежности (вероятности безотказной работы в течение периода времени  $T$ ) тех АРЗ, через которые проходит путь поставки ЦП к данному потребителю; технической надежности задвижек, отсекающих эти зоны от остальной части ТПС. Как видим, расчет надежности зоны  $P_k$  не зависит от структуры зоны, но этого нельзя сказать о расчете показателя ФН ТПС  $P^f$  относительно конкретного потребителя. В последнем случае структура ТПС, которая образуется топологическими связями между АРЗ, непосредственно сказывается на значении ФН.

Аналитический метод расчета ФН ТПС относительно конкретного потребителя предполагает обязательное разбиение всей сети на АРЗ [3]. По этой причине в дальнейшем будем данный метод называть методом АРЗ.

Расчет ФН с помощью усовершенствованного метода АРЗ предполагает выполнение семи этапов:

1-й этап. Формируется математическая модель ТПС со сложной топологической структурой в виде взвешенного графа

$$G[z, l, \lambda, \mu, p] = (V; z, l, \lambda, \mu, p), \quad (1)$$

где  $V$  – множество вершин, соответствующих водопроводным колодцам;  $E$  – множество ребер, соответствующих трубопроводным участкам;  $z$  – весовая функции на ребрах графа, определяющая наличие и положение задвижек на трубопроводах (используется при программном разбиении графа сети на подграфы АРЗ);  $l, \lambda, \mu, p$  – весовые функции на ребрах графа, соответственно определяющие длину трубопровода, удельную интенсивность отказов трубопроводов, интенсивность их восстановления и вероятность безотказной работы задвижек, присутствующих на концах трубопроводов. При отсутствии задвижки на трубопроводе соответствующий компонент в векторе  $p$  приравнивают единице.

2-й этап. Производится разбиение исходного взвешенного графа сложной ТПС на подграфы, каждый из которых соответствует одной АРЗ. Разбиение исходного взвешенного графа ТПС на подграфы АРЗ можно осуществлять с помощью рекурсивного алгоритма, приведенного в [4]. Исходными данными для соответствующей программы разбиения является математическая модель (1). При этом из весовых функций только функция  $z$  непосредственно участвует в разбиении. Программное разбиение исходного графа гарантирует быстрое и безошибочное формирование АРЗ.

3-й этап. Рассчитывается технической надежность  $P_k$  каждой АРЗ как системы последовательно соединенных элементов зоны:

$$P_k = \prod_{i=1}^N \left[ 1 - \frac{\lambda_i l_i}{\mu_i} Q(t_i) \right], \quad k = \overline{1, N}, \quad (2)$$

где  $\lambda_i, \mu_i, l_i$  – соответственно удельная интенсивность отказа, интенсивность восстановления и длина  $i$ -го трубопроводного участка;  $Q(t_i)$  – логическая переменная, равная 1, если  $i$ -й трубопроводный участок принадлежит  $k$ -й зоне, и равная 0 – в противном случае.

4-й этап. Преобразуется исходный взвешенный граф ТПС большой размерности  $[z, l, \lambda, \mu]$  во взвешенный граф взаимосвязи АРЗ

$$[p, p_a] = (Z, E, Z, p, p_a). \quad (3)$$

Здесь  $Z$  – множество вершин преобразованного графа, каждая из которых соответствует одной АРЗ;  $E$  – множество ребер графа, определяющее топологическую связь между АРЗ;  $p$  – весовая функция на вершинах графа, определяющая техническую надежность соответствующих АРЗ;  $p_a$  – весовая функция на ребрах графа, определяющая надежность задвижек трубопроводов, соответствующих этим ребрам.

В графе  $Z$ , кроме вершин, соответствующих АРЗ, присутствуют «фиктивные» вершины, определяющие положение источника и потребителей относительно АРЗ. Они используются для идентификации элементов (ребер) множества  $Z$ , инцидентных этим вершинам. Значения весовой функции  $p$  для «фиктивных» вершин не имеет смысла и в расчете искомого показателя не участвуют. Данные вершины можно исключить из множества  $Z$ . В графе  $Z$ , кроме вершин, соответствующих АРЗ, присутствуют «фиктивные» вершины, определяющие положение источника и потребителей относительно всех АРЗ. Они используются для идентификации элементов (ребер) множества  $Z$ , инцидентных этим вершинам. Значения весовой функции  $p$  для «фиктивных» вершин не имеет смысла и в расчете искомого показателя не участвуют. Данные вершины можно исключить из множества  $Z$ . В этом случае ребра можно идентифицировать соответствующей задвижкой  $a_i, i \in \{1, n\}$ .

Граф АРЗ является графической моделью общей структуры трубопроводной сети. Он показывает, каким образом и с помощью какой запорной арматуры стыкуются между собой АРЗ, источник целевого продукта и потребители. А главное, граф АРЗ содержит в полном объеме

информацию, необходимую для расчета ФН ТПС относительно любого потребителя.

*5-й этап.* Производится упрощение графа АРЗ, которое заключается в отсечение от ТПС тех АРЗ и связывающих их задвижек, которые не участвуют в транспортировании ЦП конкретному потребителю. Каждому потребителю в сети соответствует свой упрощенный граф АРЗ.

*6-й этап.* Построение расчетной модели ВН ТПС относительно конкретного потребителя. Модель на основе упрощенного графа АРЗ. При построении расчетной модели, соответствующие зонам, и ребра, соответствующие задвижкам, заменяются блоками с обозначением технической надежности соответствующих элементов сети. Расчетная модель может значительно отличаться от структуры графа. Здесь, прежде всего, следует учитывать, как каждый элемент сети влияет на поставку ЦП потребителю.

*7-й этап.* Формируются искомая математическая модель ФН сети относительно конкретного потребителя с помощью классических методов теории надежности технических систем и непосредственно рассчитывается ВНП конкретному потребителю. Для формирования математической модели ФН и проведения окончательного расчета используются следующие данные: расчетная модель функциональной надежности относительно конкретного потребителя (результат 6-го этапа); весовая функция  $p$  на вершинах графа АРЗ, которая определяет техническую надежность каждой АРЗ сети; весовая функция  $p_a$  на ребрах графа АРЗ, которая определяет техническую надежность запорной арматуры сети.

Результатом использования усовершенствованного метода АРЗ является построенная математическая модель ФН ТПС относительно конкретного потребителя. Результат расчета ВНП по полученной модели зависит: от места подключения потребителя к сети; топологической структуры ТПС, структурными элементами которой являются АРЗ, участвующие в транспорте ЦП к данному потребителю; надежности запорной арматуры, отсекающей эти АРЗ от сети и надежности самих АРЗ.

Разработанный нами аналитический метод АРЗ в первую очередь предназначен для проектирования новых, реконструкции и развития старых ТПС. Однако он может с одинаковым успехом использоваться для расчета ФН действующих распределительных и магистральных ТПС для составления графиков ремонтно-профилактических работ, определения степени риска возникновения аварийных ситуаций, а также в судебной экспертизе для установления степени ответственности субъектов разного ранга за возникновение крупных аварий и экологических

катастроф.

1.Абрамов Н.Н. Надежность систем водоснабжения. – 2-е изд. – М.: Стройиздат, 1984. – 216 с.

2.Ильин Ю.А. Надежность водопроводных сооружений и оборудования. – М.: Стройиздат, 1985. – 240 с.

3.Самойленко Н.И., Сенчук Т.С. Функциональная надежность магистральных трубопроводных транспортных систем. – Харьков: НТМТ, ХНАГХ, 2009. – 276 с.

4.Samoilenko M.I. On emergency localisation in water supply networks. Pros. of the Third International Congress on Industrial and Applied Mathematics. – Hamburg, 1995. – P.127-131.

Получено 10.11.2011

УДК 628.218

В.Р.ЧУПИН, д-р техн. наук, И.В.МАЙЗЕЛЬ, Р.В.ЧУПИН, кандидаты техн. наук  
*Национальный исследовательский Иркутский государственный технический университет  
(Российская Федерация)*

## ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ СИСТЕМ ПОВЕРХНОСТНОГО ВОДОСТОКА

Излагается методика комплексной оптимизации системы поверхностного водосбора.

Викладається методика комплексної оптимізації системи поверхневого водозбору.

The article deals with methodology of complex system of the surface water collections optimization.

*Ключевые слова:* ливневая канализация, оптимизация параметров трубопроводов и сооружений.

Ливневая канализация (ЛК) является одной из важнейших составляющих систем жизнеобеспечения городов, населенных пунктов и промышленных предприятий. Назначение ЛК заключается в предотвращении подтопления и затопления селитебных территорий, их загрязнения и загрязнения прилегающих водоемов.

Следует отметить, что в последние годы этим системам не уделялось должного внимания. В итоге, многие коллекторы просто заилены, другие разрушены и пришли в негодность. Например, в городе Иркутске из 61 км коллекторов ЛК 31 км находится в аварийном состоянии (разрушены, либо не удовлетворяют по пропускной способности). Как следствие, происходит разрушение дорожного полотна, вымывание грунта, загрязнение водоемов. Из-за существенного увеличения количества транспортных единиц загрязнения стали более насыщенными тяжелыми металлами и другими опасными элементами. Перечисленные обстоятельства делают задачу реконструкции и развития ЛК актуальной.

С учетом сложившейся ситуации, задача оптимизации параметров